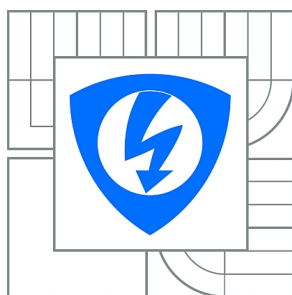




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KVADROFONNÍ AUDIO VÝKONOVÝ ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ AB

CLASS AB QUADROPHONIC AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN BAČA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Martin Bača

ID: 109631

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Kvadrofonní audio výkonový zesilovač ve třídě AB

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proved'te ideový návrh kvadrofonního audio výkonového zesilovače ve třídě AB, včetně návrhu předzesilovače, s možností ovládání hlasitosti, balance a korekce kmitočtové charakteristiky. K zesilovači navrhnete vhodnou napájecí jednotku. Vlastnosti navržených zapojení over'te simulacemi v programu PSpice.

Na základě předchozích prací proved'te návrhy desek plošných spojů v programu Eagle. Proved'te kompletní konstrukci kvadrofonního audio výkonového zesilovače předepsaných vlastností, včetně předzesilovače a napájecí jednotky. Zapojení oživte, proměřte jeho základní parametry a srovnejte s parametry obdrž'enými počítačovou simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOTISA, Z. NF zesilovače 2 - integrované výkonové zesilovače. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[2] DOUGLAS, D. Audio Power Amplifier Design Handbook. New York: Newnes - ELSEVIER, 2006.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančik, CSc.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Bača
Bytem: Otmarova 7, Třebíč, 674 01
Narozen/a (datum a místo): 16. května 1988 v Třebíči

(dále jen „autor“)

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Kvadrofonní audio výkonový zesilovač ve třídě AB

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc..

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem nízkofrekvenčního výkonového zesilovače včetně předzesilovače, s možností ovládání hlasitosti, balance a úpravy kmitočtové charakteristiky. Navrhovaný kvadrofonní zesilovač je vhodný pro všeobecné použití a dosahuje střední úrovně kvality. Zesilovač je navržen tak, aby byl realizovatelný z běžné maloobchodní součástkové základny. Práce se dále zabývá návrhem vhodné napájecí jednotky. V práci je též řešeno chlazení výkonových prvků. Práce dále obsahuje výsledky měření funkčního prototypu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkofrekvenční, zesilovač, předzesilovač, zdroj, třída, integrovaný obvod

ABSTRACT

This thesis deals with low-frequency power amplifiers, including preamplifiers, with volume control, balance, and adjustments of frequency characteristics. The proposed quadraphonic amplifier is suitable for general use and has a medium level of quality. The amplifier is designed to be feasible on a normal retail component base. The thesis also deals with the appropriate power unit. The paper also dealt with cooling power elements. Work also includes the results of prototype measurements.

KEYWORDS

Lowfrequency, amplifier, preamplifier, power supply, class, integrated circuit

BAČA, M. *Kvadrofonní audio výkonový zesilovač ve třídě AB*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 33 s., 8 s. příloh. Semestrální práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Kvadrofonní audio výkonový zesilovač ve třídě AB jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Blokové schéma zařízení	2
2 Korekční předzesilovač	3
2.1 Charakteristika korekčních předzesilovačů	3
2.1.1 Fyziologická regulace hlasitosti.....	3
2.2 Návrh řešení	4
2.2.1 Důvody použití lm1036	4
2.2.2 Popis IO	4
2.2.3 Důležité parametry lm1036	5
2.3 Návrh předzesilovače.....	6
2.3.1 Schéma zapojení	6
2.3.2 Popis funkce.....	6
3 Výkonový zesilovač	7
3.1 Charakteristika.	7
3.1.1 Nejpoužívanější třídy nf zesilovačů.....	7
3.2 Návrh řešení	8
3.2.1 Důvody použití TDA7294	8
3.2.2 Popis IO	9
3.2.3 Důležité parametry TDA7294	10
3.3 Návrh výkonového zesilovače	11
3.3.1 Schéma zapojení	11
3.3.2 Popis funkce.....	11
4 Zdroj	12
4.1 Dílčí části zdroje	12
4.1.1 Transformátor	12
4.1.2 Plynulý proudový náběh	12
4.1.3 Usměrňovač	13

4.1.4	Vyhlažovací filtr	13
4.1.5	Stabilizátor napětí	13
4.2	Návrh napájecí jednotky	14
4.2.1	Schéma zdroje	14
4.2.2	Popis schématu zdroje	14
4.2.3	Výpočet zdroje	15
4.2.4	Simulace zdroje.....	17
5	Chlazení	18
5.1	Návrh chlazení	18
5.1.1	Návrh chladiče výkonového stupně	18
5.1.2	Návrh regulace otáček ventilátorů	18
5.1.3	Návrh chladiče LM317	19
6	Návrh desek plošných spojů	20
6.1	Deska plošných spojů napájecího zdroje pro výkonový zesilovač	20
6.2	Deska plošných spojů napájecího zdroje pro korekční předzesilovač	20
6.3	Deska plošných spojů výkonového zesilovače	20
6.4	Deska plošných spojů korekčního předzesilovače.....	20
7	Měření základních parametrů	21
7.1	Korekční předzesilovač.....	21
7.1.1	Měření modulové kmitočtové charakteristiky	21
7.1.2	Měření závislosti regulace hlasitosti	23
7.1.3	Měření přeslechů signálu mezi kanály.....	25
7.1.4	Měření vstupního odporu	26
7.1.5	Měření harmonického zkreslení.....	26
7.1.6	Použité přístroje	26
7.2	Výkonový zesilovač.....	27
7.2.1	Měření modulové kmitočtové charakteristiky	27
7.2.2	Měření maximálního výstupního výkonu	28
7.2.3	Měření účinnosti	28
7.2.4	Měření vstupního odporu zesilovače	29
7.2.5	Měření výstupního odporu zesilovače	29
7.2.6	Určení činitele tlumení zátěže.....	29
7.2.7	Měření rychlosti přeběhu SR	29

7.2.8	Měření harmonického zkreslení.....	30
7.2.9	POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ.....	30
8	Závěr	31
	Literatura	34
	Seznam příloh	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Blokové schéma zařízení	2
Obr. 2 Fletcher-Munsonovy křivky (převzato z [1])	3
Obr. 3 Struktura LM1036 (převzato z [5])	4
Obr. 4 Schéma zapojení pro 1. a 2. kanál korekčního předzesilovače	6
Obr. 5 Bloková struktura TDA7294 (převzato z [5])	9
Obr. 6 Schéma zapojení jednoho kanálu výkonového zesilovače (převzato z [5])	11
Obr. 7 Schéma zapojení zdroje napětí	14
Obr. 8 Napětí na výstupu napájecího zdroje	17
Obr. 10 Modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače pro kanál 1	22
Obr. 11 Frekvenční závislost regulace hlasitosti korekčního předzesilovače pro kanál 1	25
Obr. 12 Modulová frekvenční charakteristika výkonového zesilovače pro kanál 1	28
Obrázek I Schéma výkonového zesilovače pro dva kanály	36
Obrázek II Celkové schéma zapojení	37
Obrázek III Deska plošných spojů korekčního předzesilovače M 1:1 (84 x 55 mm)	38
Obrázek IV Deska plošných spojů výkonového zesilovače pro 2 kanály M 1:1 (85 x 64 mm)	38
Obrázek V Deska plošných spojů napájecího zdroje M 1:1 (95 x 80 mm)	39
Obrázek VI Deska plošných spojů zdroje pro korekční předzesilovač M 1:1 (101 x 54 mm)	39
Obrázek VII Osazovací plán korekčního předzesilovače	40
Obrázek VIII Osazovací plán výkonového zesilovače pro dva kanály	40
Obrázek IX Osazovací plán napájecího zdroje	41
Obrázek X Osazovací plán zdroje pro korekční předzesilovač	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Důležité parametry lm1036 (převzato z [2])	5
Tabulka 2 Důležité parametry tda7294 (převzato z [5]).....	10
Tabulka 3 Modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače pro první kanál	21
Tabulka 4 Závislost regulace hlasitosti korekčního předzesilovače ($U_1 = 775 \text{ mV}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	23
Tabulka 5 Frekvenční závislost regulace hlasitosti korekčního předzesilovače pro kanál 1	24
Tabulka 6 Přeslechy korekčního předzesilovače ($U_1 = 775 \text{ mV}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	25
Tabulka 7 Vstupní odpor pro všechny kanály	26
Tabulka 8 Harmonické zkreslení korekčního předzesilovače ($U_1=775 \text{ mV}$, $f=1 \text{ kHz}$, $THD+N_{GEN}=0,035\%$)	26
Tabulka 9 Modulová kmitočtová charakteristika ($U_1 = 10 \text{ mV}$).....	27
Tabulka 10 Vstupní odpor všech kanálů.....	29
Tabulka 11 THD koncového zesilovače pro kanál 1 ($f=1 \text{ kHz}$, $RZ=4 \text{ } \Omega$, $THD+N_{GEN}=0,035\%$).....	30
Tabulka 12 THD koncových zesilovačů ($f = 1 \text{ kHz}$, $RZ = 4 \text{ } \Omega$, $THD+N_{GEN}=0,035\%$)	30

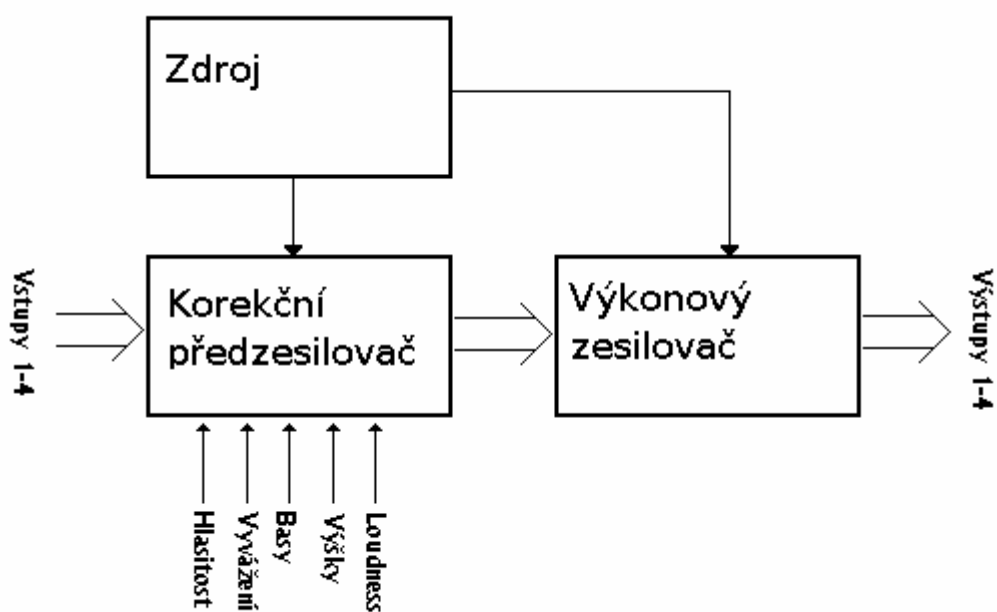
ÚVOD

Tato bakalářská práce se bude zabývat ideovým návrhem nízkofrekvenčního zesilovače a jeho následnou realizací. Nízkofrekvenční zesilovače mají široké uplatnění v životě každého člověka ať už to je poslech informačních hlášení v prostředcích městské hromadné dopravy, či rozhlasu v automobilech, při sledování televize, nebo při organizovaných shromážděních. NF zesilovače nás obklopují všude a provází nás v podstatě celý život. Tato práce ukáže návrh a realizaci kvadrofonního zesilovače vhodného pro všeobecné použití na střední úrovni kvality a sestavený z běžné maloobchodní součástkové základny. Výstupem této práce bude teoretický podklad, obvodová schémata, návrhy desek plošných spojů a praktická realizace navržených zapojení včetně jejich naměřených základních vlastností.

Následující text je členěn do 8 základních částí. Kapitola 1 ukazuje blokově celé zařízení. Kapitola 2 se bude zabývat blokem korekční zesilovač. Kapitola 3 se zabývá výkonovými zesilovači. Napájecí zdroj bude popsán v kapitole 4. Kapitola 5 se zabývá chlazením zařízení. V 6. kapitole je popis desek plošných spojů. Výsledky měření realizovaných bloků budou prezentovány v kapitole 7. 8. kapitola stručně shrne celou práci.

1 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ

Návrh zařízení vychází z blokového schématu na Obr.1. Následující kapitoly se budou zabývat popisem jednotlivých funkčních bloků schématu.



Obr. 1 Blokové schéma zařízení

2 KOREKČNÍ PŘEDZESILOVAČ

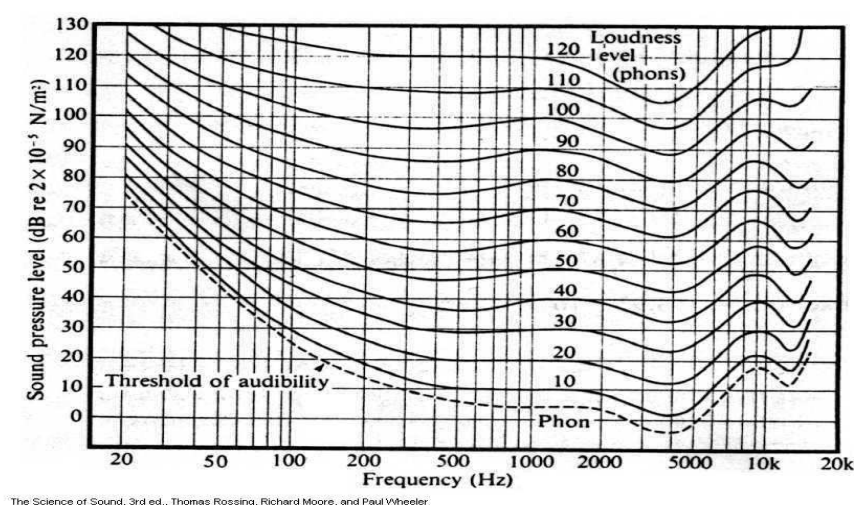
2.1 Charakteristika korekčních předzesilovačů

Slouží pro úpravu a zesílení vstupního signálu. Korekce se provádí nastavením přenosu v jednotlivých pásmech. Nejčastěji používané korekční zesilovače jsou dvoupásmové a třípásmové Baxandall nebo dvoupásmové typu Williamson. První zmiňované umožňují nastavení hloubek a výšek a jsou často označovány jako sdružené korektory. Třípásmové oproti dvoupásmovým umožňují navíc nastavení přenosu na středním kmitočtu. Do skupiny korekčních zesilovačů patří také zesilovače s pevně nastavenou přenosovou charakteristikou (např. RIAA).

S rozvojem elektroniky poskytují korekční zesilovače čím dál častěji další doplňkové funkce. Mezi nejčastější patří např. regulace hlasitosti včetně funkce fyziologické regulace hlasitosti (loudness), přepínání mezi více vstupy a často také obsahují funkci slučování signálů z více vstupů do jednoho kanálu. Lze jich využít také ve funkci mezilehlých zesilovačů případně budičů koncových stupňů.

2.1.1 Fyziologická regulace hlasitosti

Závislost lidského ucha na frekvenci není konstantní. Proto byl vyvinut frekvenčně závislý obvod, který zdůrazňuje hluboké tóny tak, aby dva současně znějící tóny – střední a hluboký, byly vnímány stejně hlasitě při různé hlasitosti poslechu celku. Lidský sluch je nejcitlivější ve frekvenčním pásmu 1 - 3 kHz. Závislost lidského sluchu na frekvenci zobrazují Fletcher-Munsonovy křivky (viz. Obr.2), nebo křivky podle Stevense, které jsou novější a reprezentativnější než křivky F-M.



Obr. 2 Fletcher-Munsonovy křivky (převzato z [1])

2.2 Návrh řešení

2.2.1 Důvody použití lm1036

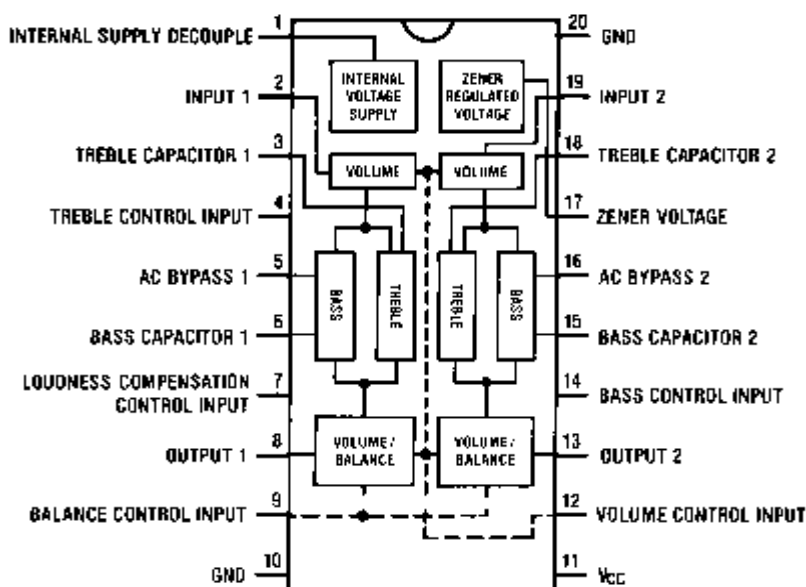
Jako korekční předzesilovač byl zvolen integrovaný obvod. Integrovaná koncepce v dnešních dnech dosahuje kvality zvuku téměř jako řešení diskrétní, přitom je obvodové zapojení jednodušší, což usnadní případné budoucí opravy.

Po průzkumu nabízených možností byl zvolen obvod LM1036 firmy National Semiconductor, který dosahuje poměrně kvalitních parametrů a je běžně k dispozici na našem trhu.

2.2.2 Popis IO

LM1036 je stereofonní monolitický předzesilovač umožňující při použití malého počtu externích součástek ovládat hlasitost, vyvážení a úpravu frekvenční charakteristiky konkrétně basů a výšky. Obvod dále umožňuje fyziologickou regulaci hlasitosti tzv. loudness.

Čtyři řídicí vstupy zajišťují řízení úrovně basů, výšek, hlasitosti a vyvážení kanálů přivedením stejnosměrného napětí přes potenciometry z vnitřního referenčního zdroje napětí, nebo ze zdroje externího. Jednotlivé mezní kmitočty obvodových částí pro úpravu frekvenční charakteristiky lze nastavit pomocí jednoho kondenzátoru na požadovanou hodnotu.



Obr. 3 Struktura LM1036 (převzato z [5])

2.2.3 Důležité parametry lm1036

Vybrané důležité parametry pro úspěšný návrh byly shrnuty do následující tabulky.

VCC=12V, TA=25°C

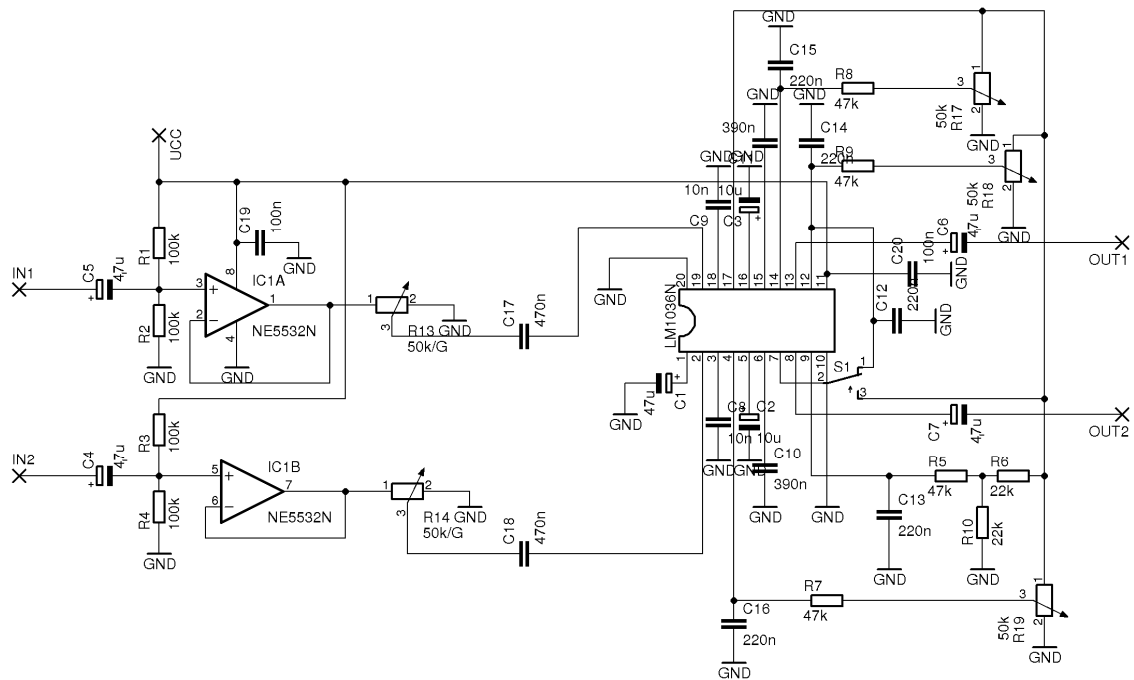
Parametr	Minimální hodnota	Typická hodnota	Maximální hodnota	Jednotky
Napájecí napětí	9		16	V
Odběr proudu		35	45	mA
Maximální vstupní napětí při f=1 kHz, Gain=-10 dB	1,3	1,6		V
Maximální výstupní napětí při f=1 kHz U _{CC} =9V U _{CC} =12V		0,8 1,0	0,8	V V
Vstupní impedance při f=1 kHz	20	30		kΩ
Výstupní impedance při f=1 kHz		20		Ω
Maximální zesílení	-2	0	2	dB
Rozsah regulace hlasitosti při f=1 kHz	70	75		dB
Rozsah regulace hloubek při f=40 Hz, C _b =0,39uF, U(Pin 14)=U(Pin 17) U(Pin 14)=0V	12 -12	15 -15	18 -18	dB dB
Rozsah regulace výšek při f=16 kHz, C _t =0.01μF, U(Pin 4)=U(Pin 17) U(Pin 4)=0V	12 -12	15 -15	18 -18	dB dB
THD při f=1 kHz, U _{IN} =0.3 Vrms Gain=0 dB Gain=-30 dB		0,06 0,03	0,3	% %
Odstup signál šum	75	80		dB

Tabulka 1 Důležité parametry lm1036 (převzato z [2])

2.3 Návrh předzesilovače

2.3.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení zvoleného řešení pro dva kanály (viz Obr.4). Popis následuje v části 2.3.2.



Obr. 4 Schéma zapojení pro 1.a 2. kanál korekčního předzesilovače

2.3.2 Popis funkce

Obvod LM1036 využívá ke svému řízení stejnosměrné napětí. V zapojení byl vybrán pro řízení obvodu vnitřní referenční zdroj tvořený Zenerovou diodou 5,4V. Toto napětí je vyvedeno na pin 17. Na ten jsou připojeny potenciometry určené pro řízení jednotlivých vlastností. Referenčním napětím se dále řídí fyziologická regulace tzv. loudness, která je aktivována spojením pinu 7 a 12. Střední kmitočty obvodů zajišťující úpravu frekvenční charakteristiky jsou určeny dvojicí kondenzátorů. Konkrétně pro basy jsou to C10 a C11 a pro výšky C8 a C9. Dále jsou zapojeny v běžících potenciometrů RC články, které slouží k potlačení rušivých složek v obvodu řízení stejnosměrného napětí. Kondenzátory na vstupu a výstupu slouží ke galvanickému oddělení signálů. Hodnoty externích součástek byli použity dle katalogového listu[2].

Vstupní část zapojení byla doplněna o operační zesilovač NE5532. Ten vyniká malým šumem, a proto je vhodný pro audio aplikace [3]. Operační zesilovač je zapojený jako sledovač, který slouží pro zvýšení vstupního odporu zařízení. Sledovač bylo nutné doplnit o odporový dělič připojený mezi napájecí napětí a zem. Tímto děličem je přivedeno předpětí, které je nutné kvůli nesymetrickému napájení operačního zesilovače. Za sledovač je připojen potenciometr s logaritmickou charakteristikou, který slouží k nastavení hlasitosti jednotlivých kanálů. Tím, že je každý kanál samostatně nastavitelný, je dosaženo optimálního vyvážení.

3 VÝKONOVÝ ZESILOVAČ

3.1 Charakteristika.

Výkonový zesilovač je výkonový měnič, mající za úkol vybudit membránu reproduktoru na potřebný elektrický výkon, který se přemění na akustický výkon. Koncový zesilovač může být v diskrétním, integrovaném nebo hybridním provedení. Napájení koncového zesilovače je buď nesymetrické, nebo symetrické. U automobilových zesilovačů se pro výkonnější systémy používá napěťový měnič. Výkonové zesilovače jsou provozovány v různých třídách, které definují buď pracovní charakteristiku koncového stupně výkonového zesilovače, nebo základní princip činnosti celého zesilovače.

3.1.1 Nejpoužívanější třídy nf zesilovačů

Třída A

Zesilovače v této pracovní třídě se vyznačují lineární charakteristikou a velmi nízkým zkreslením. Tohoto stavu je docíleno nastavením pracovního bodu tranzistoru doprostřed lineární části jeho charakteristiky klidovým proudem. Po přivedení signálu na vstup je pracovní bod posunován po charakteristice čímž vzniká signál výstupní což má za následek, že s rostoucí amplitudou vstupního signálu roste podstatně zkreslení. Zapojení je proto vhodné jen pro malé výkony cca. do 20W [4]. Zařízení v této třídě též dosahují velmi nízké účinnosti okolo 25% [4], a proto je chlazení velmi náročné a drahé.

Třída B

Ve třídě B je každá půlvlna signálu zpracována vlastním tranzistorem, proto není na tranzistory přivedeno předpětí. Díky tomu tranzistor pracuje v nelineární části charakteristiky, a proto při přivedení signálů s nízkou úrovní bude výsledný signál značně zkreslen. Proto není vhodný pro stavbu kvalitnějších audio zařízení [4]. Největší výhodou je vysoká účinnost, která může teoreticky dosáhnout 78,5% [4].

Třída AB

Tato třída je kompromisem mezi třídou A a B. Její zapojení je téměř shodné se zapojením třídy B, ovšem na tranzistory je přivedeno předpětí, které nastaví pracovní bod za koleno jeho charakteristiky čímž dochází téměř k eliminaci zkreslení. Zavedením předpětí došlo k nepatrnému snížení účinnosti na hodnotu okolo 70% [4]. Tato třída se v nízkofrekvenční technice používá velmi často z důvodu nízkého zkreslení, které může u kvalitních zařízení dosahovat hodnot 0,001 až 0,1% a poměrně vysoké účinnosti.

Třída D

Tento zesilovač je označován jako digitální, jelikož vstupní signál je modulován pulsně šířkovou modulací. Namodulovaný signál pak budí koncový stupeň. Na výstupu zesilovače je dolní propust, která převede modulovaný signál zpět na spojitý nízkofrekvenční signál. Koncové tranzistory pracují ve spínaném režimu na frekvenci od 100 – 300 kHz, kde mají nejmenší ztráty. Hlavní výhodou zesilovače je jeho účinnost, která se pohybuje typicky okolo 80% [4]. Díky tomuto faktu není nutné chladit tolik jako ekvivalentní zesilovače výše popsaných tříd.

Navzdory vysoké účinnosti a z toho plynoucích výhod není tato třída příliš rozšířená, protože díky své koncepci poměrně značně zkresluje signál a při špatném návrhu skříně zesilovače může být zdrojem značného vysokofrekvenčního rušení.

3.2 Návrh řešení

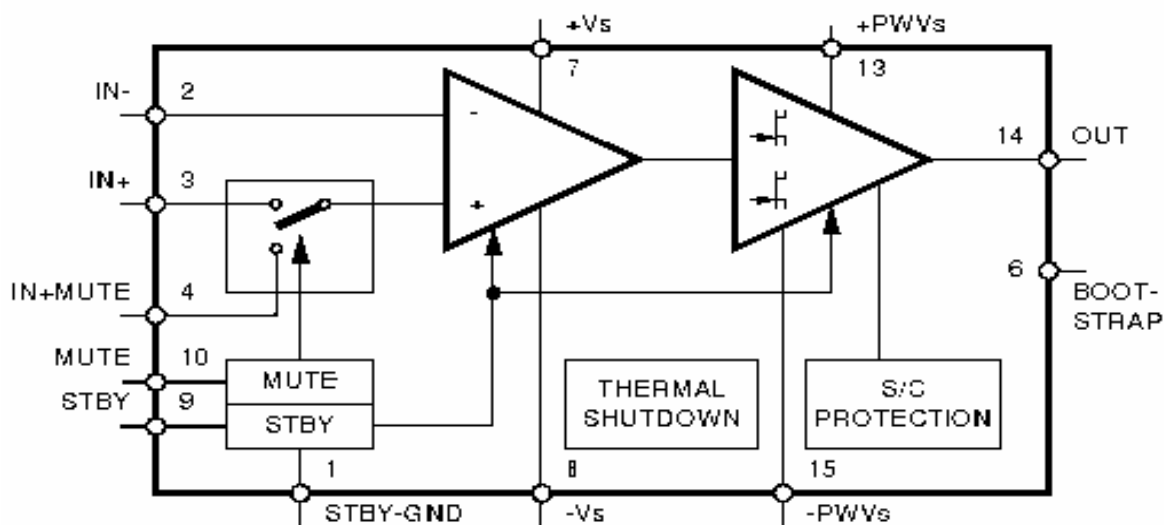
3.2.1 Důvody použití TDA7294

Jako výkonový zesilovač byl zvolen integrovaný obvod. Integrovaná koncepce v dnešních dnech dosahuje kvality zvuku téměř jako řešení diskrétní přitom je zapojení jednodušší, což usnadní případné budoucí opravy.

Po průzkumu nabízených možností byl zvolen obvod TDA 7294, který dosahuje poměrně kvalitních parametrů a je k dispozici na našem trhu.

3.2.2 Popis IO

TDA7294 je monolitický výkonový zesilovač ve třídě AB. Tento obvod je vhodný pro použití na poli HI-FI zařízení. Koncový stupeň s tranzistory D-MOS je navržen tak, aby byl schopen odolat velkému napětí a vysokému proudu s minimálním harmonickým zkreslením co nejméně závislém na frekvenci. Díky velkému rozsahu napájecí napětí $\pm 40\text{V}$ a schopnosti dodat do zátěže velký proud činí obvod vhodný pro použití jak do zátěže 4 tak i 8Ω . Obvod také obsahuje ochranné obvody pro případ zkratu a teplotní pojistku, která dokáže snížit výkon či zesilovač úplně odstavit. Dále obsahuje samostatné CMOS logické obvody zajišťující funkci mute a stand by vyvedené na příslušné piny. Jejich řídicí napětí koresponduje s napájecím napětím obvodu.



Obr. 5 Bloková struktura TDA7294 (převzato z [5])

3.2.3 Důležité parametry TDA7294

Vybrané důležité parametry pro úspěšný návrh byly shrnuty do následující tabulky.

$U_{cc} = \pm 35V$, $R_z = 8\Omega$, $G_V = 30dB$; $R_g = 50\Omega$; $T = 25^\circ C$, $f = 1\text{ kHz}$ není-li stanoveno jinak

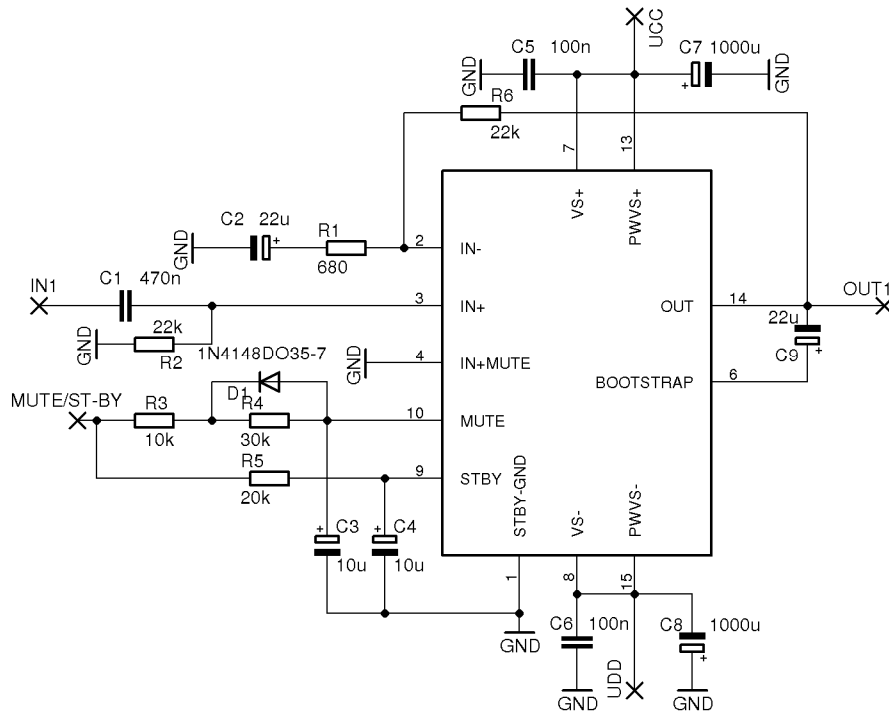
Parametr	Minimální hodnota	Typická hodnota	Maximální hodnota	jednotky
Rozsah napájecího napětí	± 10		± 40	V
Klidový proud	20	30	65	mA
Střední hodnota trvalého výstupního výkonu při THD = 0.5%: $U_{cc} = \pm 35V$, $R_L = 8\Omega$ $U_{cc} = \pm 31V$, $R_L = 6\Omega$ $U_{cc} = \pm 27V$, $R_L = 4\Omega$	60 60 60	70 70 70		W W W
Celkové harmonické zkreslení $P = 5W$; $f = 1\text{ kHz}$ $P = 0.1$ až $50W$; $f = 20\text{ Hz}$ až 20 kHz		0,01	0,1	% %
Napěťové zesílení se zpětnou vazby	20	30	40	dB
Vstupní šum $f = 20\text{ Hz}$ až 20 kHz	2	5		μV
Frekvenční odezva (-3dB) $P = 1W$	20Hz až 20kHz			
Vstupní impedance	100			k Ω

Tabulka 2 Důležité parametry tda7294 (převzato z [5])

3.3 Návrh výkonového zesilovače

3.3.1 Schéma zapojení

Doporučené schéma zapojení zvoleného řešení pro jeden kanál (viz Obr 6). Popis funkce následuje v části 3.3.2. Skutečné schéma viz příloha.



Obr. 6 Schéma zapojení jednoho kanálu výkonového zesilovače (převzato z [5])

3.3.2 Popis funkce

Jelikož je zapojení všech čtyř kanálů identické, bude popsána funkce pouze pro kanál 1. Nízkofrekvenční signál na vstup zesilovače přivádíme přes vazební kondenzátor C1. Větev tvořená kondenzátorem C2 a rezistory R1, R6 tvoří zpětnou vazbu. Zapojení z rezistorů R 3,4,5 a kondenzátorů C 3,4 zajišťují funkci postupného náběhu (soft-start), která zajistí postupný náběh a tedy zabráni nepříjemným zvukovým projevům „lupancům“ z reproduktorů. Kondenzátory C 5,6 slouží jako odrušovací a je tedy nutné jejich umístění co nejbližší k daným vstupům. Kondenzátory C 7, 8 jsou filtrační.

4 ZDROJ

4.1 Dílčí části zdroje

4.1.1 Transformátor

Většina nízkofrekvenčních zesilovačů vyžaduje symetrické napájení. Symetrické napájení lze dosáhnout spojením sekundárních vinutí běžných transformátorů. Tento způsob ovšem vykazuje řadu nevýhod, a proto se používá transformátor se symetrickým sekundárním vinutím. Nejčastěji se v napětových zdrojích pro nízkofrekvenční zesilovače používají levnější transformátory s jádrem EI, ale jejich hmotnost, rozměry, ztráty a rozptylové pole jsou větší než u toroidních transformátorů. U kvalitnějších zesilovačů se užívá toroidní transformátor se stínicí fólií, která se nachází mezi primárním a sekundárním vinutím a zabraňuje průniku rušivých napětí a impulsů ze sítě na sekundární vinutí[2]. Napájecí zdroje v zesilovačích jsou zpravidla nestabilizované z důvodu dalších tepelných ztrát. Proto je velice důležité, aby výkon transformátoru nebyl roven jmenovitému příkonu koncových zesilovačů, ale minimálně o 30% vyšší. Jen tak je schopen rychle dodat energii do filtračních kondenzátorů, dojde-li k velkému proudovému odběru. Slabší transformátor a filtrační kondenzátory s malou kapacitou nebudou schopny vyrovnat proudovou špičku a dojde tak k velkému poklesu napájecího napětí koncových zesilovačů, které budou limitovat výstupní signál.

4.1.2 Plynulý proudový náběh

V okamžiku připojení transformátor k síti vzniká proudová špička. Tento stav je způsoben magnetizačním proudem transformátoru a nenabitými filtračními kondenzátory. Proudová špička je tím větší, čím se perioda síťového napětí v okamžiku zapnutí blíží k 90° nebo k 270° . U zesilovačů s výkonem nad 200W může dojít i k výpadku 16A jističe v síťovém rozvodu [2].

Tomuto jevu lze předejít mnoha způsoby. Nejčastěji se však používají sériově připojený rezistor k primárnímu vinutí transformátoru, který je po určitém čase přemostěn pomocí relé. Tím se vytvoří plynulý proudový náběh[2].

Další možná varianta je použití termistoru sériově zapojeného k primárnímu vinutí transformátoru. Termistor má v okamžiku připojení větší odpor a procházejícím proudem se zahřívá, což vede k poklesu jeho odporu na minimum a tedy ke vzniku minimálních ztrát. Hlavní výhoda tohoto zapojení spočívá v jeho jednoduchosti. Dalším avšak méně rozšířeným způsobem je připnutí v optimální fázi napájecího napětí. Tento způsob je z jmenovaných možných řešení nejdokonalejší, avšak také nejnáročnější na realizaci.

4.1.3 Usměrňovač

Za transformátorem se nachází usměrňovač. Ten, jak plyne z názvu slouží pro usměrnění střídavého napětí na napětí stejnosměrné. Nejčastěji se používá usměrňovač můstkový. Je zkonstruován ze 4 diod, které je možné blokovat paralelně zapojenými kondenzátory s malou kapacitou. Jejich účel spočívá v odvedení napětíového impulsu, který by se mohl dostat ze sítě až na spotřebič.

4.1.4 Vyhlažovací filtr

Vyhlažovací filtr tvoří kondenzátor s velkou kapacitou, který v sobě hromadí náboj. Jestliže dojde k poklesu napětí vlivem špičky v hudebním signálu, kondenzátor tento pokles vyrovná. Proto je důležité volit nejen kondenzátory s velkou kapacitou, ale též s velkými nabíjecími a vybíjecími proudy[9]. Velikost kapacity kondenzátorů má vliv na maximální odebíraný proud ze zdroje a na požadované zvlnění napětí při tomto proudu.

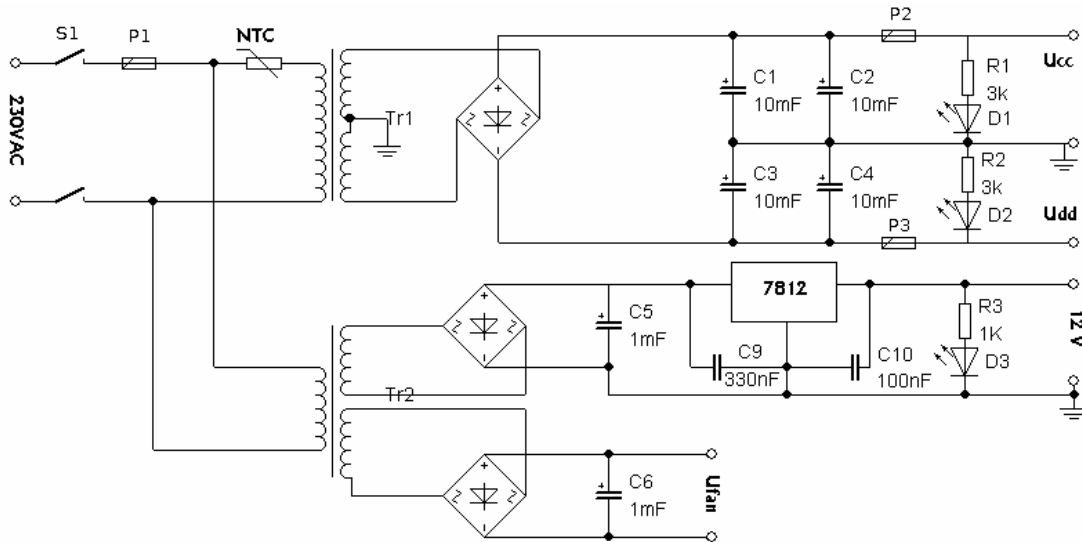
4.1.5 Stabilizátor napětí

Stabilizátor je elektrotechnický člen, který stabilizuje výstupní napětí při změnách napětí vstupního. Stabilizátory můžeme dělit na integrované nebo diskrétní. Diskrétní dále dělíme na parametrické a zpětnovazební. Parametrické stabilizátory využívají parametrů součástek, nejčastěji průběhu VA charakteristik Zenerovy diody nebo lavinové diody v závěrném směru. Hlavní nevýhodou je malá účinnost. Zpětnovazební stabilizátory porovnávají referenční napětí s napětím výstupním a podle výsledku porovnání pak regulují aktivní člen (nejčastěji tranzistor). Integrované stabilizátory lze rozdělit na nastavitelné (např. Lm317) a na stabilizátory s pevně daným napětím (řada 78, 79).

4.2 Návrh napájecí jednotky

4.2.1 Schéma zdroje

Schéma zapojení zvoleného řešení napájecí jednotky (viz Obr.7). Popis funkce následuje v části 2.6.2.



Obr. 7 Schéma zapojení zdroje napětí

4.2.2 Popis schématu zdroje

Síťové napětí je přes spínač přivedeno přes pojistku na transformátor Tr1 a Tr2. Transformátor Tr2 převede síťové napětí na 12V a 12V. Napětí z prvního sekundárního vnutí je poté usměrněno a vyfiltrováno. Usměrněné napětí je přivedeno na stabilizátor 7812. Z výstupu stabilizátoru je napětí přivedeno na svorky. Napětí z druhého sekundárního vnutí je pouze usměrněno, vyfiltrováno a vyvedeno na svorky. Na transformátor Tr1 je napětí přivedeno přes NTC Termistor který zajistí plynulý proudový náběh [9]. Jelikož je sekundární vnutí transformátoru symetrické bude popsána pouze kladná větev zdroje. Z transformátoru je napětí přivedeno na můstkový usměrňovač. Za usměrňovačem se nachází filtr tvořený paralelní kombinací elektrolytických kondenzátorů. Dále je napětí přes pojistku přivedeno na výstupní svorky a přes rezistor na indikační LED diodu.

4.2.3 Výpočet zdroje

Výpočet sekundárního napětí transformátoru

$$U_{CC}=30V, U_M=1,2V$$

$$U_2 = \frac{U_{CC}}{\sqrt{2}} + U_M = \frac{30}{\sqrt{2}} + 1,2 = 22,41 V \quad (4.1)$$

U_2 skutečné napětí na sekundárním vynutí

U_{CC} napájecí napětí koncového zesilovače

U_M úbytek napětí na můstkovém usměrňovači

Pozn.: Zvolen běžně dostupný toroidní transformátor 2x 24V

Výpočet přesného napájecího napětí

$$U_2=24V, U_M=1,2V$$

$$U_{CCV} = (U_2 - U_M) \cdot \sqrt{2} = (24 - 1,2) \cdot \sqrt{2} = 32,24 V \quad (4.2)$$

U_{CCV} ..skutečné napájecí napětí koncového zesilovače

U_2 skutečné napětí na sekundárním vynutí

U_M úbytek napětí na můstkovém usměrňovači

Střední hodnota proudu pro maximální výkon

$$I_S = \frac{P_S}{U_{CCV}} = \frac{70}{32,24} = 2,17 A \quad (4.3)$$

U_{CCV} ..skutečné napájecí napětí koncového zesilovače

P_S výkon zesilovače

I_S střední hodnota proudu pro maximální výkon

Výkon transformátoru

$$P_{TR} = 1,3 \cdot k \cdot I_S \cdot U_{CCV} = 1,3 \cdot 4 \cdot 2,17 \cdot 32,24 = 363,792 VA \quad (4.4)$$

P_{TR} výkon transformátoru

I_S střední hodnota proudu pro maximální výkon

U_{CCV} ..skutečné napájecí napětí koncového zesilovače

k počet zesilovačů

Maximální proud transformátoru

$$I_C = \frac{P_{TR}}{U_{CCV}} = \frac{450}{32,24} = 13,96 \text{ A} \quad (4.5)$$

P_{TR} výkon transformátoru

I_C maximální proud transformátoru

U_{CCV} ..skutečné napájecí napětí koncového zesilovače

Kapacita filtračního kondenzátoru

$$C = \frac{k \cdot 4 \cdot I_S}{p \cdot U_{CCV}} = \frac{300 \cdot 8680}{5 \cdot 32,24} = 16153,84 \mu\text{F} \quad (4.6)$$

k konstanta pro můstek

I_S střední hodnota proudu pro maximální výkon

U_{CCV} ..skutečné napájecí napětí koncového zesilovače

p zvlnění výstupního napětí v %

Pozn.: Zvoleno paralelní zapojení dvou kondenzátorů 10mF

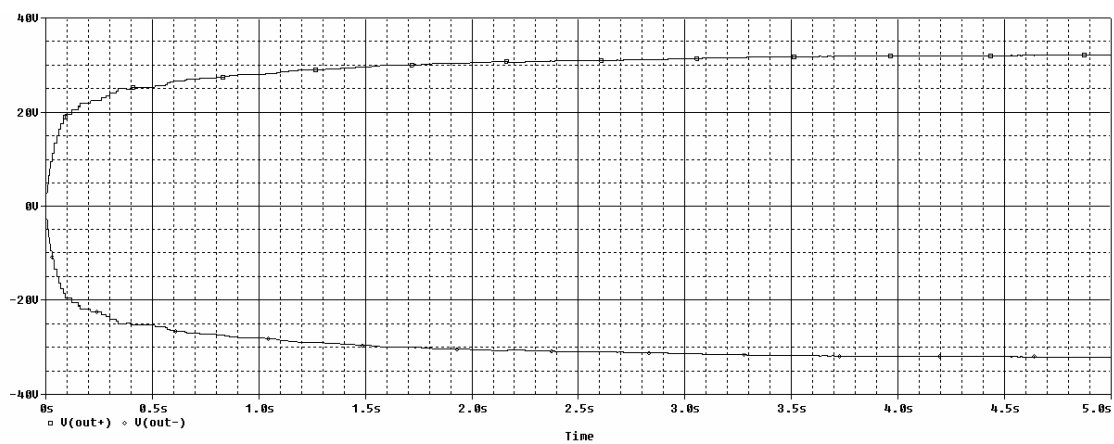
Předřadný odpor pro LED diodu

$$R_{LED} = \frac{U_{CCV} - U_f}{I_{LED}} = \frac{32,24 - 2,15}{10 \cdot 10^{-3}} = 3090 \Omega \quad (4.7)$$

Pozn.: Zvolen rezistor 3k Ω z řady E12

4.2.4 Simulace zdroje

Simulace zdroje (viz Obr.8) zobrazuje průběh napětí na výstupu s připojenou symetrickou zátěží.



Obr. 8 Napětí na výstupu napájecího zdroje

5 CHLAZENÍ

5.1 Návrh chlazení

Nejvýznamnějším zdrojem tepla v zařízení jsou bezesporu integrované obvody výkonových stupňů, na nichž vznikají desítky wattů ztrátového výkonu [5]. Tento výkon v podobě tepla je nutné odvést do prostoru. K tomuto účelu slouží chladiče.

5.1.1 Návrh chladiče výkonového stupně

Pro chlazení výkonových zesilovačů je v konstrukci využito společného chladiče pro všechny čtyři kanály (návrh viz níže).

Tepelný odpor chladiče pro jeden obvod TDA7294 se vypočítá (vztah převzat z [10]):

$$R_{ich} = \frac{\Theta_{j\max} - \Theta_{a\max}}{P_{\max}} - (R_{ti} + R_{th}) = \frac{150 - 50}{32} - (1,5 + 0,4) = 1,225^\circ\text{C/W} \quad (5.1)$$

Katalogový list obvodu TDA7294 [5] uvádí hodnotu tepelného odporu mezi pouzdrem součástky a vnitřním systémem. Typická je $R_{ti}=1^\circ\text{C/W}$, maximálně však je $R_{ti}=1,5^\circ\text{C/W}$. Maximální vyžářený výkon $P_{\max}=32\text{W}$ byl zvolen dle předpokládané zátěže $8\ \Omega$ a napájecího napětí. Maximální teplota přechodu $\Theta_{j\max}=150^\circ\text{C}$ a maximální teplota okolního prostředí $\Theta_{a\max}=50^\circ\text{C}$ byla zvolena v rozsahu pracovních teplot obvodu TDA7294, který činí 0 až 70°C . $R_{th}=0,4^\circ\text{C/W}$ je typická hodnota tepelného odporu pro silikonové podložky.

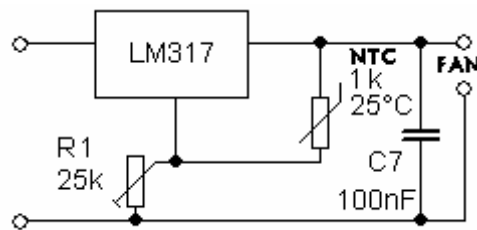
Tepelný odpor chladiče pro jeden obvod obvod by měl být minimálně $1,225^\circ\text{C/W}$. Jelikož je třeba chladit čtyři tyto obvody, musí být tepelný odpor čtyřikrát menší.

$$R_{ichc} = \frac{R_{ich}}{4} = 0,306^\circ\text{C/W} \quad (5.2)$$

Protože tato hodnota je poměrně nízká, byl zvolen chladič Chl45v3-12, který sestává z hliníkového profilu a nuceného chlazení proudícím vzduchem pomocí ventilátorů. Tato konfigurace dosahuje tepelného odporu $0,22\text{K/W}$ [11].

5.1.2 Návrh regulace otáček ventilátorů

Chladič byl navržen tak, aby obstál při nejhorších možných provozních podmínkách, které pravděpodobně nikdy při provozu nenastanou. Proto byl navržen jednoduchý obvod pro regulaci otáček ventilátorů dle teploty chladiče (viz Obr. 9). Jedná se o jednoduchý spojitý regulátor využívající nastavitelný zdroj napětí LM317 a termistor s negativní závislostí odporu na teplotě. Zapojení bylo převzato z katalogového listu LM317 [12]. Rezistor byl nahrazen termistorem sloužícím jako snímač teploty.



Obr. 9 Regulace otáček ventilátoru

5.1.3 Návrh chladiče LM317

Jelikož bude obvod poměrně významně zatěžován, je třeba ho chladit.

Výpočet ztrátového výkonu (vztah převzat z [12]):

$$P_{D\max} = (V_{in} - V_{out}) \cdot I_L = (19 - 2) \cdot 0,2 = 3,4W \quad (5.3)$$

$P_{D\max}$ maximální ztrátový výkon

V_{in} vstupní napětí

V_{out} minimální výstupní napětí

I_L proud dodaný do zátěže

Výpočet tepelného odporu chladiče (vztah převzat z [12]):

$$R_{tch} = \frac{\Theta_{j\max} - \Theta_{a\max}}{P_{\max}} - (R_{ti} + R_{th}) = \frac{125 - 50}{3,4} - (2 + 0,4) = 19,65^\circ C/W \quad (5.4)$$

Hodnotu tepelného odporu mezi pouzdrem součástky a vnitřním systémem je $R_{ti} = 2^\circ C/W$ [12].

$R_{th} = 0,4^\circ C/W$ je typická hodnota tepelného odporu pro silikonové podložky.

Maximální teplota přechodu $\Theta_{j\max} = 125^\circ C$ [12]

Maximální teplota okolního prostředí $\Theta_{a\max} = 50^\circ C$

Tepelný odpor chladiče R_{tch}

Tepelný odpor chladiče pro jeden obvod by měl být minimálně $19,65^\circ C/W$. Jelikož je třeba chladit dva tyto obvody, musí být tepelný odpor dvakrát menší.

$$R_{tchc} = \frac{R_{tch}}{2} = 9,83^\circ C/W \quad (5.5)$$

Pro dostatečný odvod ztrátového tepla by měl chladič mít tepelný odpor alespoň $9,83^\circ C/W$.

6 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

Pro návrh desek plošných spojů byl využit návrhový systém Eagle. Návrhy jednotlivých modulů jsou uvedeny v příloze **B** a osazovací výkresy v příloze **C**.

6.1 Deska plošných spojů napájecího zdroje pro výkonový zesilovač

Deska plošných spojů napájecího zdroje pro výkonový zesilovač byla navržena jako jednostranná (viz. Příloha B, Obrázek III). Osazovací plán je uveden Příloha C, Obrázek VII. Můstkový usměrňovač je umístěn mimo desku plošných spojů.

6.2 Deska plošných spojů napájecího zdroje pro korekční předzesilovač

Deska plošných spojů napájecího zdroje pro korekční předzesilovač byla navržena jako jednostranná (viz. Příloha B, Obrázek IV). V rámci lepšího využití prostoru a vhodném napětí byla na desku integrována regulace otáček ventilátorů chladiče výkonového zesilovače. Osazovací plán je uveden Příloha C, Obrázek VIII.

6.3 Deska plošných spojů výkonového zesilovače

Deska plošných spojů výkonového zesilovače byla navržena jako jednostranná (viz. Příloha B, Obrázek V). Jedna deska sdružuje dva kanály, které fungují samostatně nebo v můstkovém režimu. Osazovací plán je uveden Příloha C, Obrázek IX.

6.4 Deska plošných spojů korekčního předzesilovače

Deska plošných spojů korekčního předzesilovače byla navržena jako jednostranná (viz. Příloha B, Obrázek VI). Potenciometry a přepínač fyziologické regulace byly umístěny mimo desku plošných spojů. Osazovací plán je uveden Příloha C, Obrázek X.

7 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ

Po osazení a oživení modulů korekčního předzesilovače a výkonového zesilovače byly změřeny základní charakteristiky. Jelikož byly všechny kanály navrženy identicky, plnohodnotné měření pouze pro kanál 1, u zbylých kanálů proběhly pouze kontrolní měření v menším rozsahu, aby byla ověřena „shodnost“. Naměřené hodnoty budou následně porovnány s hodnotami uváděnými výrobcí integrovaných obvodů [2], [5].

7.1 Korekční předzesilovač

7.1.1 Měření modulové kmitočtové charakteristiky

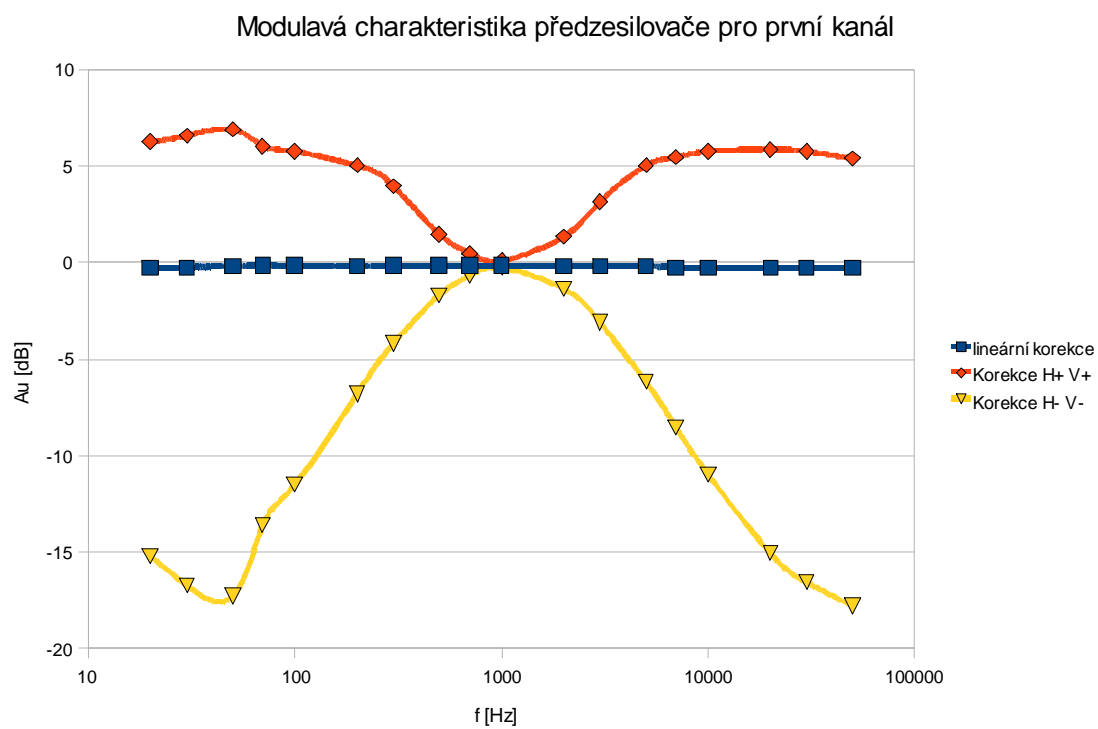
Měření bylo provedeno pro první kanál postupně pro lineární korekci, maximální zdůraznění hloubek a výšek a maximální potlačení hloubek a výšek pro vstupní napětí $U_1 = 775$ mV. Před měřením byl nastaven přenos $A_u = 1$ na kmitočtu $f = 1$ kHz

f [Hz]	Lineární korekce		Korekce H+ a V+		Korekce H- a V-	
	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]
20	750	-0,28	1590	6,24	135	-15,18
30	752	-0,26	1650	6,56	113	-16,72
50	759	-0,18	1710	6,87	106	-17,28
70	761	-0,16	1550	6,02	162	-13,60
100	760	-0,17	1500	5,74	206	-11,51
200	759	-0,18	1380	5,01	354	-6,81
300	760	-0,17	1220	3,94	477	-4,22
500	760	-0,17	917	1,46	638	-1,69
700	760	-0,17	819	0,48	715	-0,70
1000	760	-0,17	783	0,09	750	-0,28
2000	759	-0,18	904	1,34	662	-1,37
3000	758	-0,19	1110	3,12	542	-3,11
5000	757	-0,20	1380	5,01	380	-6,19
7000	752	-0,26	1450	5,44	290	-8,54
10000	751	-0,27	1500	5,74	219	-10,98
20000	750	-0,28	1520	5,85	137	-15,05
30000	750	-0,28	1500	5,74	115	-16,57
50000	749	-0,30	1440	5,38	100	-17,79

Tabulka 3 Modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače pro první kanál

Příklad výpočtu:

$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log \frac{760}{775} = -0,17 \text{ dB} \quad (7.1)$$



Obr. 10 Modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače pro kanál 1

7.1.2 Měření závislosti regulace hlasitosti

První měření bylo provedeno bez fyziologické regulace a s fyziologickou regulací („loudness“), a to při vstupním napětí $U_1 = 775$ mV a na kmitočtu $f = 1$ kHz.

Jako další byla změřena frekvenční závislost funkce fyziologické regulace hlasitosti. Měření bylo provedeno při vstupním napětí $U_1 = 775$ mV a na polovině rozsahu hlasitosti.

Hlasitost	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_{2loud} [mV]	A_U [dB]
1	0,073	-80,52	0,073	-80,52
2	0,1	-77,79	0,079	-79,83
3	1,1	-56,96	0,928	-58,44
4	8,5	-39,20	6,7	-41,26
5	22	-30,94	23	-30,55
6	222	-10,86	209	-11,38
7	445	-4,82	451	-4,70
8	750	-0,28	759	-0,18
9	832	0,62	840	0,70
10	852	0,82	852	0,82

Tabulka 4 Závislost regulace hlasitosti korekčního předzesilovače ($U_1 = 775$ mV, $f = 1$ kHz)

Příklad výpočtu:

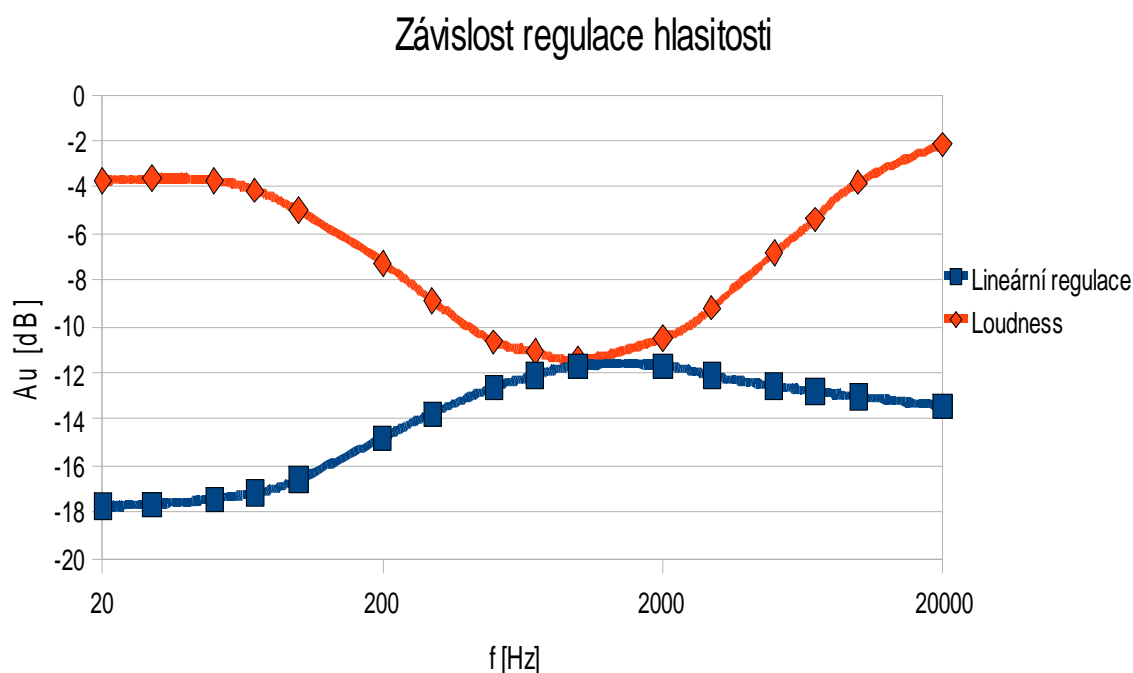
$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log \frac{22}{775} = -30,94 \text{ dB}$$

f [Hz]	Lineární regulace		Loudness	
	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]
20	100,2	-17,77	504,2	-3,73
30	101,3	-17,67	510,8	-3,62
50	104,0	-17,45	506,3	-3,70
70	107,2	-17,18	481,5	-4,13
100	114,7	-16,59	435,7	-5,00
200	141,0	-14,80	335,9	-7,26
300	159,0	-13,76	279,0	-8,87
500	181,2	-12,62	227,3	-10,65
700	191,8	-12,13	216,3	-11,08
1000	201,6	-11,7	207,6	-11,44
2000	201,6	-11,7	231	-10,51
3000	191,6	-12,14	268,3	-9,21
5000	182,5	-12,56	352,4	-6,85
7000	177,1	-12,82	417,5	-5,37
10000	173	-13,03	501,2	-3,79
20000	165,1	-13,43	605	-2,15

Tabulka 5 Frekvenční závislost regulace hlasitosti korekčního předzesilovače pro kanál 1

Příklad výpočtu:

$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log \frac{201,6}{775} = -11,7 \text{ dB}$$



Obr. 11 Frekvenční závislost regulace hlasitosti korekčního předzesilovače pro kanál 1

7.1.3 Měření přeslechů signálu mezi kanály

Při měření přivedeme signál z generátoru $U_1 = 775 \text{ mV}$ na vybraný kanál a změříme výstupní napětí na druhém kanálu. Měření bylo provedeno bez korekcí, na kmitočtu $f = 1 \text{ kHz}$ a přenosu $A_u = 1$.

$f \text{ [Hz]}$	Kanál 1→Kanál 2		Kanál 2→Kanál 1	
	$U_2 \text{ [mV]}$	Přeslech [dB]	$U_2 \text{ [mV]}$	Přeslech [dB]
100	219	-73,19	185	-74,66
1000	397	-68,02	337	-69,45
10000	2630	-51,6	2040	-53,81

$f \text{ [Hz]}$	Kanál 3→Kanál 4		Kanál 4→Kanál 3	
	$U_2 \text{ [μV]}$	Přeslech [dB]	$U_2 \text{ [μV]}$	Přeslech [dB]
100	203	-73,85	195	-74,2
1000	374	-68,54	329	-69,66
10000	2467	-52,16	2389	-52,44

Tabulka 6 Přeslechy korekčního předzesilovače ($U_1 = 775 \text{ mV}$, $f = 1 \text{ kHz}$)

Příklad výpočtu:

$$A_u = 20 \cdot \log \cdot U_2 = 20 \cdot \log \cdot 374 = -68,54 \text{ dB} \quad (7.2)$$

7.1.4 Měření vstupního odporu

Do přívodu mezi nízkofrekvenční generátor a přípravek byl do série vložen potenciometr. Při nastavené hodnotě odporu 0Ω bylo nastaveno výstupní napětí $U_2 = 500\text{mV}$. Zvyšováním odporu dokud výstupní napětí neklesne na polovinu, zjistíme vstupní odpor. Měření bylo provedeno na kmitočtu $f = 1\text{kHz}$.

Kanál	$R_{\text{vst}} [\text{k}\Omega]$
1	50
2	50
3	50
4	50

Tabulka 7 Vstupní odpor pro všechny kanály

7.1.5 Měření harmonického zkreslení

Měření provedeno při vstupním napětí $U_1 = 775\text{ mV}$ a při frekvenci $f = 1\text{kHz}$ pomocí milivoltmetru Grundig MV 100.

Kanál	$U_2 [\text{mV}]$	$THD+N [\%]$
1	775	0,177
2	776	0,154
3	772	0,169
4	774	0,172

Tabulka 8 Harmonické zkreslení korekčního předzesilovače ($U_1=775\text{ mV}$, $f=1\text{ kHz}$, $THD+N_{\text{GEN}}=0,035\%$).

7.1.6 Použité přístroje

Generátor Agilent 33220A

Milivoltmetr Grundig MV100

Zdroj Agilent E3631

Osciloskop Tektronix TDS1012

Proměnný odpor $100\text{k}\Omega$

7.2 Výkonový zesilovač

7.2.1 Měření modulové kmitočtové charakteristiky

Měření bylo provedeno pro první kanál při $U_1 = 10 \text{ mV}$ při použité zátěži 4Ω

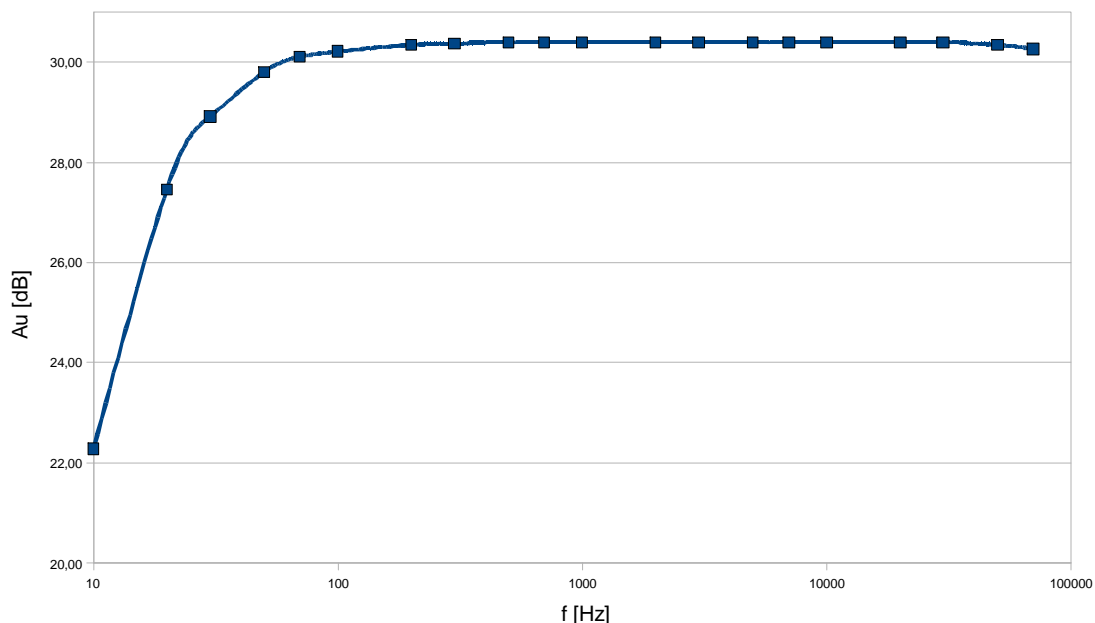
$f \text{ [Hz]}$	$U_2 \text{ [V]}$	$A_U \text{ [dB]}$
10	130	22,28
20	236	27,46
30	279	28,91
50	309	29,80
70	320	30,10
100	324	30,21
200	329	30,34
300	330	30,37
500	331	30,40
700	331	30,40
1000	331	30,40
2000	331	30,40
3000	331	30,40
5000	331	30,40
7000	331	30,40
10000	331	30,40
20000	331	30,40
30000	331	30,40
50000	329	30,34
70000	326	30,26

Tabulka 9 Modulová kmitočtová charakteristika ($U_1 = 10 \text{ mV}$).

Příklad výpočtu pro frekvenci 100 Hz

$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log \frac{324}{10} = 30,21 \text{ dB}$$

Modulová frekvenční charakteristika výkonového zesilovače pro kanál 1



Obr. 12 Modulová frekvenční charakteristika výkonového zesilovače pro kanál 1

7.2.2 Měření maximálního výstupního výkonu

Měření provedeno pro první kanál na kmitočtu $f = 1\text{kHz}$ a na zátěži $R_Z = 4\ \Omega$, $U_2 = 16,8\text{V}$.

$$P_{\max} = \frac{U_2^2}{R_Z} = \frac{16,8^2}{4} = 70,56\text{W} \quad (7.3)$$

7.2.3 Měření účinnosti

Účinnost koncového stupně lze stanovit jako poměr maximálního výstupního výkonu a příkonu koncového zesilovače.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_1} = \frac{P_{\max}}{U_N \cdot I_N} = \frac{70,56}{50 \cdot 2,02} = 0,67 \quad (7.4)$$

U_Nnapájecí napětí

I_Nodběr proudu z napájecího zdroje

7.2.4 Měření vstupního odporu zesilovače

Do přívodu mezi nízkofrekvenční generátor a přípravek byl do série vložen potenciometr. Při nastavené hodnotě odporu 0Ω bylo nastaveno výstupní napětí $U_2 = 1\text{V}$. Zvyšováním odporu dokud výstupní napětí neklesne na polovinu, zjistíme vstupní odpor. Měření bylo provedeno na kmitočtu $f = 1\text{kHz}$.

Kanál	$R_{vst} [\text{k}\Omega]$
1	22
2	22
3	22
4	22

Tabulka 10 Vstupní odpor všech kanálů

7.2.5 Měření výstupního odporu zesilovače

Na zátěži $R_Z = 4\Omega$ bylo změřeno výstupní střídavé napětí. Poté bylo změřeno napětí na prázdko. Měření provedeno na frekvenci $f = 1\text{kHz}$.

$$U_2 = 1,645\text{ V}$$

$$U_{20} = 1,664\text{ V}$$

$$R_{vyst} = \frac{U_{20} - U_2}{U_2} \cdot R_Z = \frac{1,664 - 1,645}{1,645} \cdot 4 = 0,05\Omega \quad (7.5)$$

7.2.6 Určení činitele tlumení zátěže

Měření bylo provedeno na kmitočtu $f = 1\text{kHz}$.

$$D = \frac{R_Z}{R_{vyst}} = \frac{4}{0,05} = 80 \quad (7.6)$$

7.2.7 Měření rychlosti přeběhu SR

Rychlost přeběhu je míra rychlosti reakce zesilovače na buzení obdélníkovým signálem. Měření bylo provedeno na těsně podlimitním výkonu. Zesilovač je buzen obdélníkovým signálem a výstupní signál se integrační povahou obvodu zkreslí na lichoběžníky. Použitý osciloskop umožňuje přímé měření. Měření bylo provedeno pro kanál 1.

$$\text{Rychlost přeběhu náběžné hrany } SR_{rise} = 10,17\text{ V}/\mu\text{s}$$

$$\text{Rychlost přeběhu sestupné hrany } SR_{fall} = 9,84\text{ V}/\mu\text{s}$$

7.2.8 Měření harmonického zkreslení

Měřeno milivoltmetrem Grundig MV 100 při $f = 1\text{ kHz}$ při různých výstupních výkonech na zatěžovacím odporu o hodnotě $R_z = 4\ \Omega$.

U_2 [V]	P_2 [W]	THD+N [%]
0,33	0,03	0,134
0,66	0,11	0,081
1,65	0,68	0,038
3,30	2,72	0,042
6,60	10,89	0,056
12,2	43,56	0,057

Tabulka 11 THD koncového zesilovače pro kanál 1 ($f=1\text{ kHz}$, $R_z=4\ \Omega$, $THD+N_{\text{GEN}}=0,035\%$)

Kanál	P_2 [W]	THD+N [%]
1	0,68	0,038
2	0,68	0,041
3	0,68	0,039
4	0,68	0,040

Tabulka 12 THD koncových zesilovačů ($f = 1\text{ kHz}$, $R_z = 4\ \Omega$, $THD+N_{\text{GEN}}=0,035\%$).

Příklad výpočtu:

$$P = \frac{U_2^2}{R_z} = \frac{1,65^2}{4} = 0,68\text{ W}$$

7.2.9 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ

Zdroj Agilent E3631

Generátor Agilent 33220A

Multimetr Agilent 34401A

Milivoltmetr Grundig MV100

Osciloskop Tektronix TDS1012

Proměnný odpor $100\text{ k}\Omega$

Reproduktor $4\ \Omega$

8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout podklady pro realizaci kvadrofonního audio výkonového zesilovače ve třídě AB včetně návrhu korekčního předzesilovače a napájecí jednotky a získaná zapojení ověřit simulacemi v programu PSpice. Na základě navržených podkladů navrhnout desky plošných spojů, sestavit prototyp a proměřit základní parametry zapojení.

Teoretická část:

Řešení bylo rozděleno na návrh dílčích částí, tedy na návrh korekčního předzesilovače, výkonového zesilovače a napájecí jednotky.

Jako korekční předzesilovač byl zvolen integrovaný obvod LM1036. Tento obvod zapouzdřuje dva kanály, proto bylo nutné použít dva tyto obvody. Zapojení korekčního předzesilovače vychází ze zapojení doporučeného výrobcem doplněné o vstupní oddělovací členy.

Výkonový zesilovač je tvořen integrovaným obvodem TDA7294. Jelikož se jedná pouze o jednokanálový obvod, bylo nutné využít 4 dílčí jednotky. Obvodové zapojení vychází z doporučeného zapojení. Funkce MUTE a ST-BY byly použity pro funkci postupného náběhu.

Pro napájení odvodů byl navržen napájecí zdroj schopný dodat nestabilizované symetrické napětí pro výkonový zesilovač a stabilizované napětí pro korekční předzesilovač.

Pro chlazení výkonového stupně byl navržen společný chladič. Jelikož zařízení produkuje velké množství tepla byl jako chladič použit hliníkový profil doplněný o nucené chlazení proudícím vzduchem. K nucenému chlazení proudícím vzduchem byl navržen spojitý regulátor který omezí hluk při nižších výkonech zesilovače při kterých poskytne dostatečné chlazení pouze pasivní chladič.

Ověření funkcí Korekčního předzesilovače a výkonového zesilovače nebylo možné z důvodu absence PSpice modelů pro použité obvody, ani pro modely podobných obvodů. Modely nebyly poskytnuty ani na vyžádání u výrobce.

Praktická část:

Dle návrhu z teoretické části byly v programu Eagle navrženy desky plošných spojů všech funkčních částí. Výroba desek plošných spojů byla realizována „na URELU“. Desky byly osazeny, oživeny a následně byly změřeny základní charakteristiky korekčního předzesilovače a výkonového zesilovače. V práci jsou prezentovány výsledky měření většinou jen pro kanál 1, jelikož ostatní kanály při kontrolním měření vykazovaly téměř shodné hodnoty.

Korekční předzesilovač:

Měření modulové kmitočtové charakteristiky

Měření bylo provedeno pro první kanál v rozsahu frekvencí 20Hz až 50kHz postupně pro lineární korekci, maximální zdůraznění hloubek a výšek a maximální potlačení hloubek a výšek. Před měřením byl nastaven přenos $A_u = 1$ na kmitočtu $f = 1$ kHz. Naměřené charakteristiky byly srovnány s možnými průběhy z katalogového listu a lze konstatovat, že naměřené průběhy jsou podobné.

Měření závislosti regulace hlasitosti

Měření bylo provedeno bez a s fyziologickou regulací na kmitočtu $f = 1$ kHz. S fyziologickou regulací i bez ní byly naměřeny velmi podobné výsledky. Byly naměřeny hodnoty -80 až 1 dB. V katalogovém listu je uveden rozsah regulace typicky 75dB. Dále byla změřena frekvenční závislost fyziologické regulace hlasitosti. Z grafu sestrojeného z naměřených hodnot plyne, že regulace funguje správně.

Přeslechy mezi kanály

Měření provedeno pro frekvence 100Hz, 1kHz a 10kHz pro všechny kanály. Přeslechy mezi kanály se pohybovaly přibližně mezi -75 dB na 100Hz až -51dB při 10kHz.

Vstupní odpor

Byly naměřeny hodnoty 50k Ω , což odpovídá návrhu. Tato hodnota by měla být dostatečně vysoká, aby nedocházelo k přetěžování výstupů pro jakýkoliv zdroj signálu.

Harmonické zkreslení

Změřené hodnoty harmonického zkreslení pro všechny kanály, které dosahuje průměrné hodnoty 0,17%, odpovídají rozsahu danému v katalogovém listu pro přenos $A_U = 0$ dB (0,06 až 0,3%).

Výkonový zesilovač:

Modulová charakteristika

Měření bylo provedeno pro kmitočty od 20Hz do 70kHz. Pokles o 3dB v měřeném rozsahu nastal pouze okolo 20Hz. Šířka přenosového pásma je tedy vhodná v celém rozsahu slyšitelného pásma.

Maximální výstupní výkon a účinnost

Změřená maximální hodnota výstupního výkonu je 70,56W, což odpovídá výkonu udávanému výrobcem. Účinnost vyšla 67%, což odpovídá třídě AB.

Vstupní odpor

U všech kanálů byl naměřen vstupní odpor $22\text{k}\Omega$, což odpovídá návrhu.

Výstupní odpor

Byl měřen nepřímou metodou, hodnota $0,05\Omega$.

Činitel tlumení

Z naměřených hodnot byl vypočítán činitel tlumení 80.

Rychlost přeběhu

Naměřené hodnoty korespondují s typickými hodnotami uvedenými v katalogovém listu.

Harmonické zkreslení

Pro první kanál odpovídaly naměřené hodnoty hodnotám odečteným z katalogového listu. Z kontrolních měření ostatních kanálů plyne praktická totožnost i v tomto případě.

Z výše uvedeného shrnutí části teoretické, praktického popisu i výsledků měření lze tedy usuzovat, že zadání bakalářské práce bylo splněno.

LITERATURA

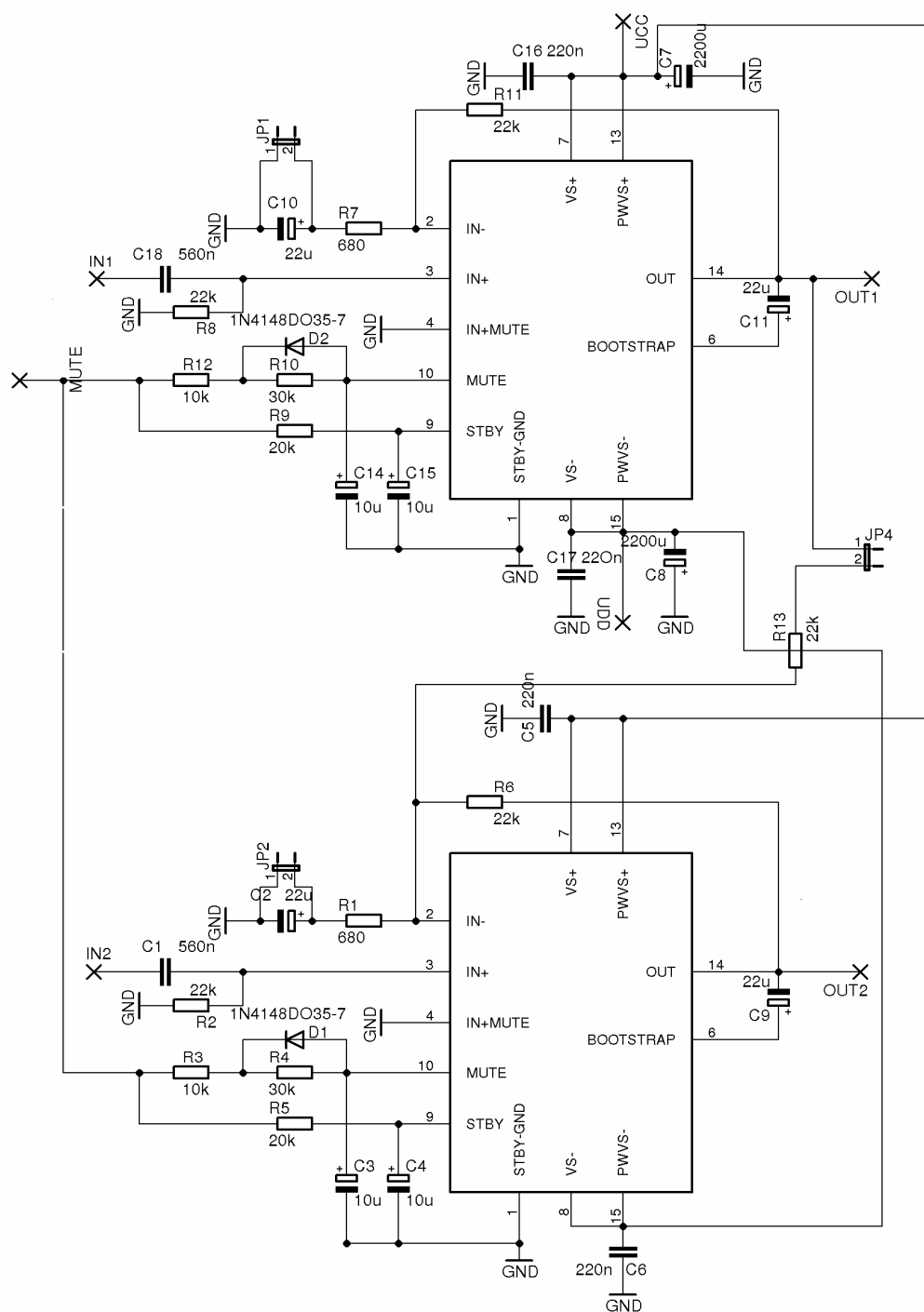
- [1] WHEELER,P. ROSSING,T. ;MOORE,R. *Fletcher-Munson diagram* Dostupné z WWW: <<http://webphysics.davidson.edu/faculty/dmb/py115/fletchermunson.jpg>> [cit.2.10.2009]
- [2] NATIONAL SEMICONDUCTOR, *Katalogové listy LM1036 Dual DC Operated Tone/Volume/Balance Circuit*. National semiconductor corporation 2008, 12s. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com>> [cit. 2.10.2009]
- [3] TEXAS INSTRUMENTS, *Katalogové listy NE5532, NE5532A DUAL LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS*. Texas Instruments Incorporated 2002, 5s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.com>> [cit.2.10.2009]
- [4] KOTISA, Z. *NF zesilovače 2 - integrované výkonové zesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 96 s. ISBN 80-7300-053-9
- [5] STMICROELECTRONICS, *Katalogové listy TDA7294 100V - 100W DMOS AUDIO AMPLIFIER WITH MUTE/ST-BY*. STMicroelectronics 2003, 17s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.com>> [cit. 2.10.2009]
- [6] DOUGLAS, D. *Audio Power Amplifier Design Handbook*. New York: Newnes - ELSEVIER, 2006. 468s. ISBN 0-7506-8072-5
- [7] DUDEK, P. Moderní výkonové zesilovače řady DPA. *Amatérské Rádio řada A*, 1992 č.1,2,3,4,10,11
- [8] DIETMEIER, U. *Vzorce pro elektroniku*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. 256 s. ISBN 80-86056-53-8
- [9] LÁNÍČEK, R. *Elektronika, obvody – součástky – děje*. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 479 s. ISBN 80-86056-25-2
- [10] FUKÁTKO, T., FUKÁTKO, J. *Teplo a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN – technická literatura,2006, 120s. ISBN 80-7300-199-3
- [11] Elektronika, Zdeněk Krčmář. *Sortiment nabídky EZK* [on-line]. Dostupné z WWW: <<http://www.ezk.cz>> [cit. 27.2.2010]
- [12] NATIONAL SEMICONDUCTOR, *Katalogové listy LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator*. National semiconductor corporation 2010, 27s. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com>> [cit. 27.3.2010]
- [13] GES Electronics, *Sortiment nabídky GES Electronics* [on-line]. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz>> [cit. 27.2.2010]
- [14] Laboratorní úloha BNFE č.2, doc. Ing. Tomáš Kratočvíl, Ph.D., FEKT VUT Brno,2009 Dostupné z WWW: <<http://www.vutbr.cz>> [cit. 27.3.2009]
- [15] Laboratorní úloha BNFE č.3, doc. Ing. Tomáš Kratočvíl, Ph.D., FEKT VUT Brno,2009 Dostupné z WWW: <<http://www.vutbr.cz>> [cit. 27.3.2009]

SEZNAM PŘÍLOH

A	OBVODOVÉ ZAPOJENÍ	36
A.1	Výkonový zesilovač.....	36
A.2	Celkové schéma zapojení.....	37
B	Desky plošných spojů	38
C	Osazovací plány	40
D	Soupiska součástek	42

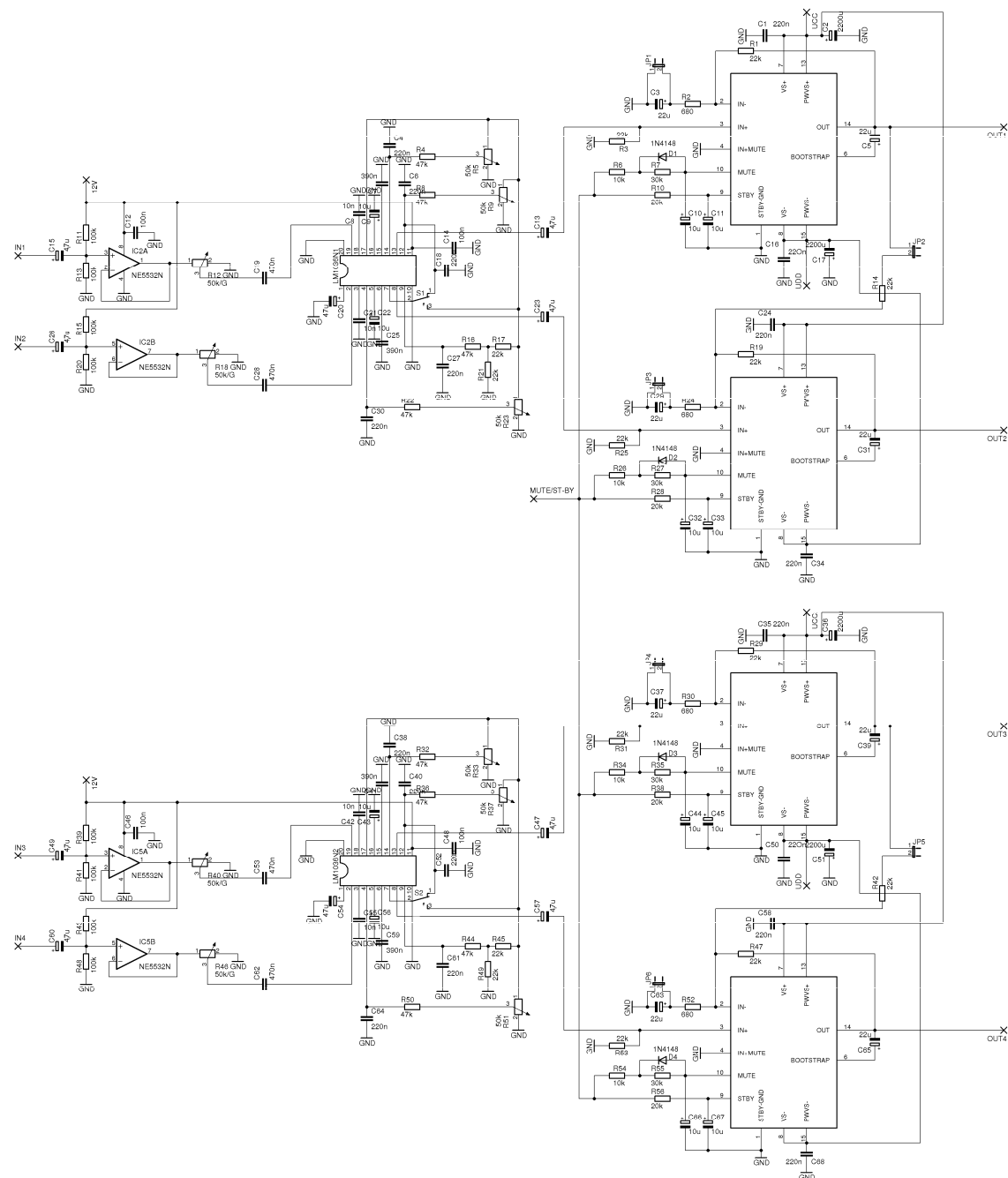
A OBVODOVÉ ZAPOJENÍ

A.1 Výkonový zesilovač



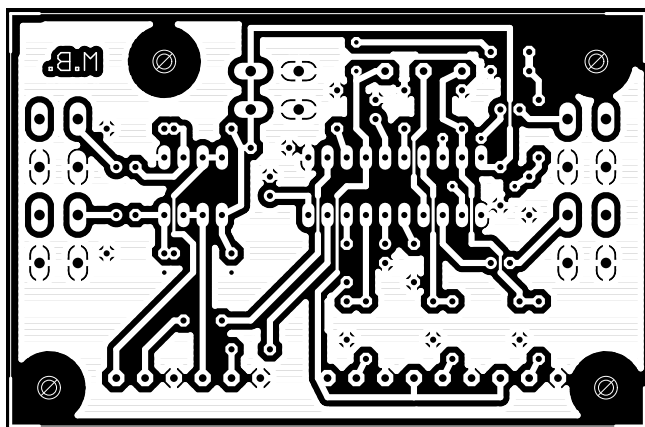
Obrázek I Schéma výkonového zesilovače pro dva kanály

A.2 Celkové schéma zapojení

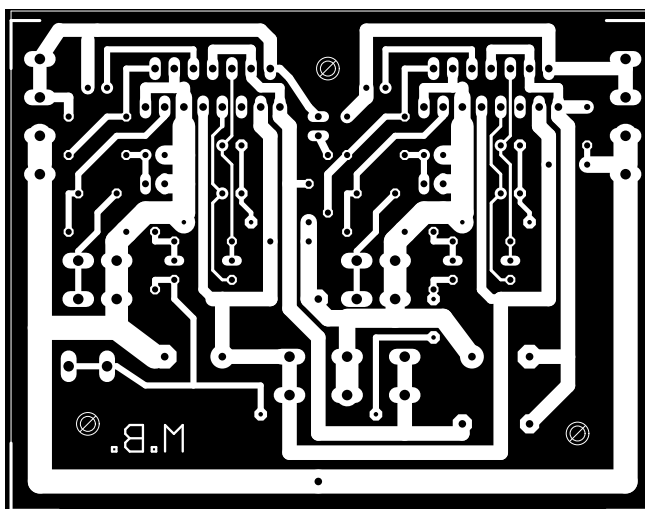


Obrázek II Celkové schéma zapojení

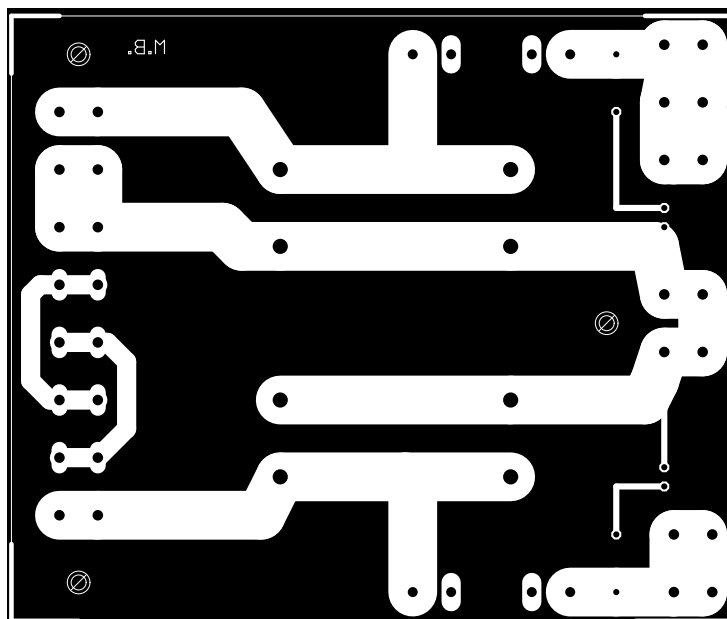
B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



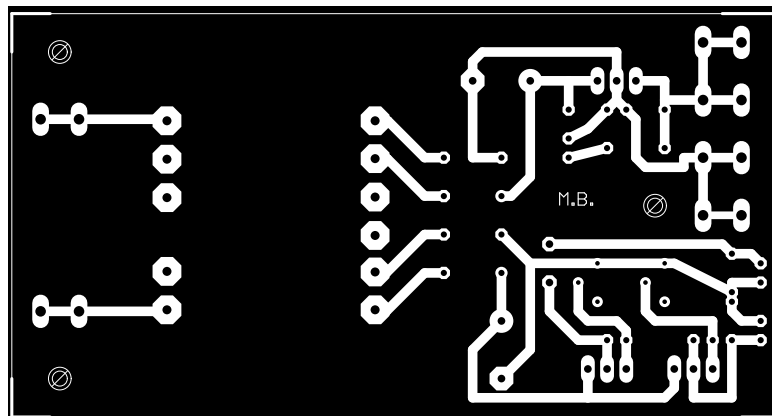
Obrázek III Deska plošných spojů korekčního předzesilovače M 1:1 (84 x 55 mm)



Obrázek IV Deska plošných spojů výkonového zesilovače pro 2 kanály M 1:1 (85 x 64 mm)

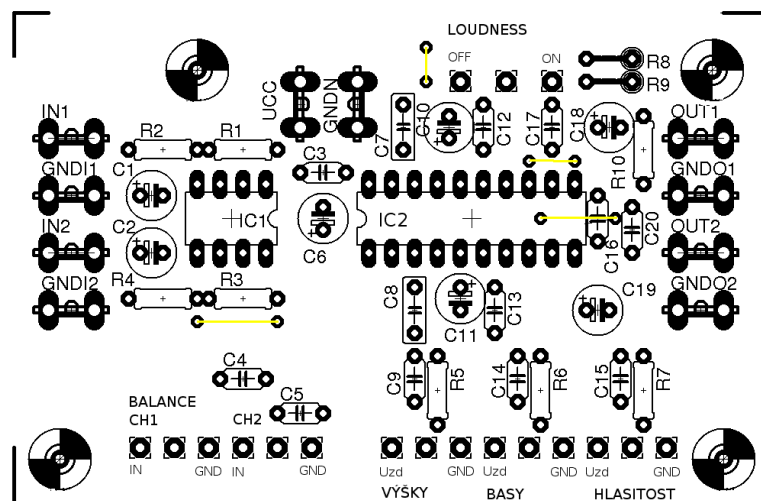


Obrázek V Deska plošných spojů napájecího zdroje M 1:1 (95 x 80 mm)

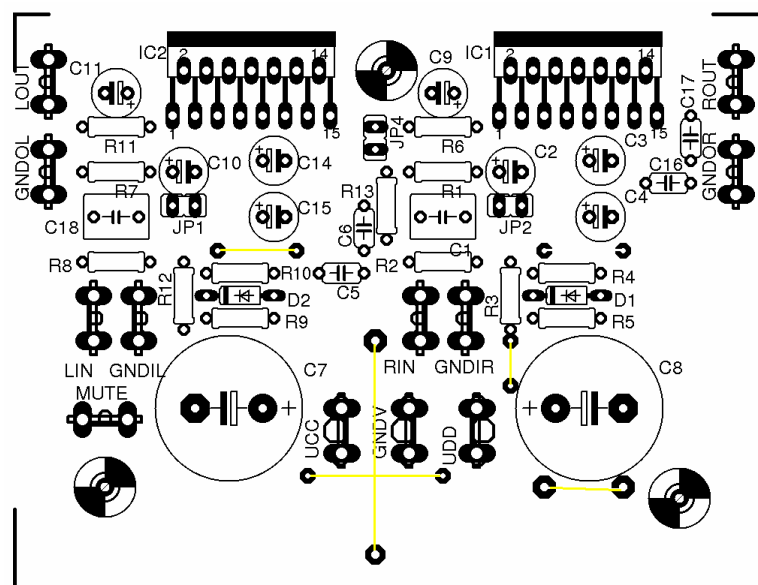


Obrázek VI Deska plošných spojů zdroje pro korekční předzesilovač M 1:1 (101 x 54 mm)

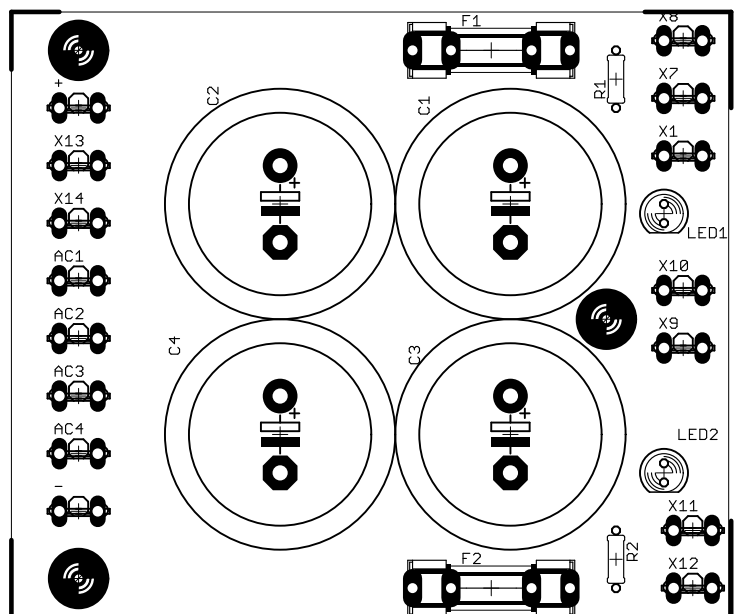
C OSAZOVACÍ PLÁNY



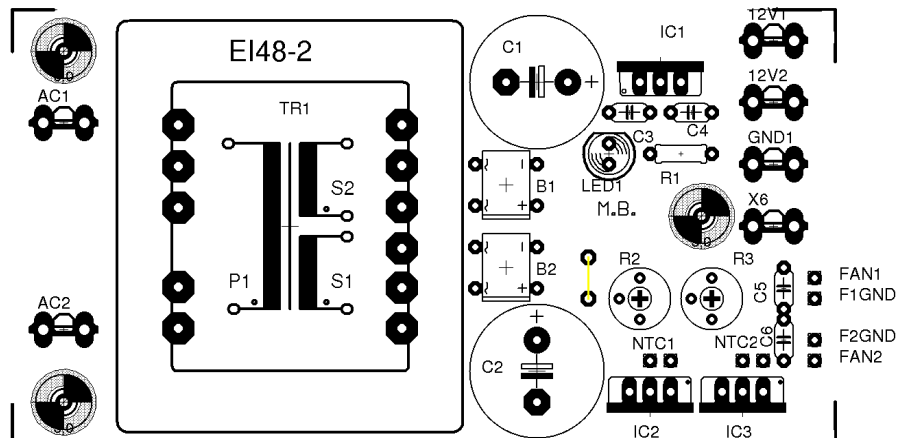
Obrázek VII Osazovací plán korekčního předzesilovače



Obrázek VIII Osazovací plán výkonového zesilovače pro dva kanály



Obrázek IX Osazovací plán napájecího zdroje



Obrázek X Osazovací plán zdroje pro korekční předzesilovač

D SOUPLSKA SOUČÁSTEK

Zdroj

kondenzátory:

10mF/50V	elektrolitycký	4ks
----------	----------------	-----

pojistky:

pomalé	20mm	2ks
--------	------	-----

LED:

modrá	5mm	2ks
-------	-----	-----

rezistory:

3k	0207	2ks
----	------	-----

konektory:

faston	6,3x08	14ks
--------	--------	------

usměrňovací můstek:

KBPC 2501	MB-25	1ks
-----------	-------	-----

Transformátor:

2x24V,450VA	toroidní	1ks
-------------	----------	-----

NTC termistor:

3A	SC13	1ks
----	------	-----

Zdroj korekce

Integrované obvody

7812	TO220V	1ks
------	--------	-----

LM317	TO220V	2ks
-------	--------	-----

kondenzátory:

1mF/50V	elektrolitycký	2ks
---------	----------------	-----

100nF	keramický	3ks
-------	-----------	-----

330nF	keramický	1ks
-------	-----------	-----

LED:

modrá	5mm	1ks
-------	-----	-----

rezistory:

1k	0207	1ks
----	------	-----

Trimry:

25k		2ks
-----	--	-----

konektory:

faston	6,3x08	6ks
SPK2		4ks

usměrňovací můstek:

DBDB102G	DB	2ks
----------	----	-----

transformátor:

2x12V, 0,41A	EI48-2	1ks
--------------	--------	-----

NTC termistor:

1k		2ks
----	--	-----

Výkon**integrované obvody**

TDA7294V	multiwatt 15	4ks
----------	--------------	-----

kondenzátory:

2200uF/50V	elektrolitycký	4ks
10uF/50V	elektrolitycký	4ks
22uF/50V	elektrolitycký	8ks
220nF	keramický	8ks
470nF	foliový	4ks

rezistory:

22k	0207	10ks
680	0207	4ks
10k	0207	4ks
20k	0207	4ks
30k	0207	4ks

konektory:

faston	6,3x0,8	8ks
faston	4,8x0,8	16ks

jumper		3ks
--------	--	-----

diody:

1N4148		4ks
--------	--	-----

Korekce**integrované obvody:**

Lm1036	DIL20	2
Ne5532	DIL8	2

kondenzátory:

4,7uF/50V	elektrolitycký	8ks
10uF/50V	elektrolitycký	4ks
47uF/50V	elektrolitycký	2ks
100nF	keramický	4ks
220nF	foliový	10ks
470nF	foliový	4ks
390nF	foliový	4ks
10nF	foliový	4ks

rezistory:

22k	0207	4ks
100k	0207	8ks
47k	0207	8ks

konektory:

Faetón 90	6,3x0,8	4ks
Faston90	4,8x0,8	16ks

potenciometry:

50k/G		4ks
50k	stereo	3ks

přepínač:

MTS 500H		1ks
----------	--	-----